

正会員 〇小谷一三 (鹿島建設)

面村計一 (鹿島建設)

塚田卓 (鹿島建設)

I. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (以下SFRCと記す) の特性を生かした用途として, 土木構造物では舗装, 橋梁の床版などがある。これらには交通荷重による曲げ応力, 上面と下面との温度差による温度応力が繰返し作用するため, 疲労特性が重要な問題となる。SFRCの曲げ疲労に関する実験例は非常に少なく, 不明な点も多い。したがって, SFRCの曲げ疲労特性を検討するために実験を実施するとともに, SFRCの曲げ強度などに影響する鋼繊維の配向および分散について検討を行なった。ここに, その結果を報告する。

II. 実験概要

1. 実験方法

図-1に示すように, 幅15×高さ20×長さ90cmのはり供試体について, 打込み面を上側に設置し, スパン80cm純曲げスパン25cmとした2点載荷法により, フローズドルーフ電気油圧式疲労試験機 (MTS社製) を用いて試験を行なうものとし, 試験荷重は, その最大値における供試体の応力度を静的破壊強度の50~90%, 最小値を50kg (線応力度約 1 kg/cm^2 に相当) とした正弦波で与え, 繰返し速度360回/分の片振り載荷とし, 一定の繰返し回数0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200万回には最大 (上限) 荷重までの静的載荷試験を行ない, スパン中央位置でのたわみ量の測定, ひびわれ発生状況調査などを行なった。

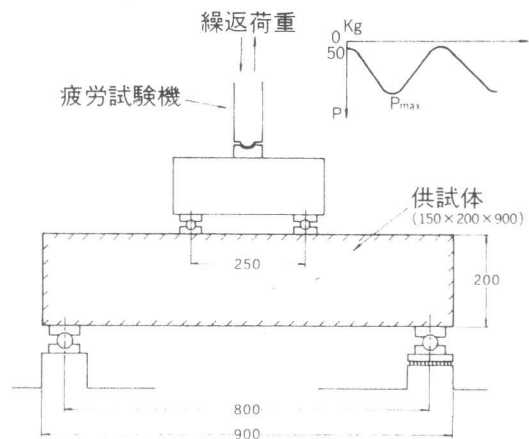


図-1 試験状況概略

2. SFRCの配合および供試体

使用したSFRCの配合は, 表-1に示すもので, 鋼繊維の混入率は1%vol, 鋼繊維は2種類である。コンクリートの練りませは, 可傾式ミキサ (容量100L) を使用してマトリックスを練りませた後に, ミキサを回転しながら鋼繊維を手で徐々に投入する方法で行なった。

供試体は, 鋼製型枠にコンクリートを2層に分けて打込み, その締固めは, 棒状振動機を型枠の外側に押当てる方法で行なった。供試体の養生は, 枚令2日で脱型し, 以後湿空養生 (RH 80~90%, 温度 $21 \pm 1^\circ\text{C}$) とした。なお, 試験時の枚令は6週~15週で, 枚令差による影響を少なくするために早強ポルトランドセメントを使用した。供試体の静的曲げ破壊強度は, 図-2に示す。

表-1 配合表

配合 No	鋼 織 維 種 類	鋼繊維 混入率 (%vol)	粗 骨 材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位セメント量 (kg/m ³)
I	Aファイバー	1.0	-	6.5*1.5	3*1	50	100	470
II	Aファイバー	1.0	15	6.5*1.5	2*1	50	62.6	445
III	Bファイバー	1.0	-	6.5*1.5	5*1	50	100	465

セメント: 早強ポルトランドセメント, 日本セメント(株)製

細骨材: 川砂(富士川産)

粗骨材: 6号碎石(東京都西多摩産, 硬質砂岩)

混和剤: ポゾリスNo. 5L, 日曹マスタービルダース(株)製

鋼繊維: Aファイバー(波形), 0.25×0.5×25mm

Bファイバー(フラット), 0.5×0.5×30mm

Ⅲ. 実験結果とその検討

1. 疲労強度

各疲労試験における最大応力度と静的破壊強度との比 S と破壊に至るまでの繰返し回数 N との関係を片対数グラフにプロットした場合、これらの試験値には鋼繊維の種類およびマトリックスの種類による差異を認めるに至らなかったため、試験値を総括して疲労曲線 ($S-N$ 曲線) を求めた。各試験値には、図-2 に示すようにかなりのばらつきが見られるが平均的な繰返し回数 200 万回における $SFR C$ の曲げ疲労強度は、静的破壊強度の約 65% となり、プレーンコンクリートが 50~60% であるのに比べて僅かに大きい値を示している。

$SFR C$ の曲げ疲労強度は、その基準のとり方によって異なり、Batson らの実験では静的試験における初期ひびわれ発生強度を基準として、ひびわれ発生までの繰返し回数から求めた疲労強度は 83% を示している。

プレーンコンクリートの疲労は、繰返し荷重によって累積される永続的な内部構造の変化の形として生じ、この変化がひびわれとなり、さらにひびわれが成長して破壊に至ると考えられている。 $SFR C$ では鋼繊維の存在が、ひびわれの発生を遅らせたり、その成長を抑制したりするため、 $SFR C$ の疲労強度はプレーンコンクリートの値に比べて増大し、鋼繊維の分布が密になるに伴って、増大するものと予想される。

今回の実験の結果では、応力比で考える限りにおいては $SFR C$ の疲労強度は、プレーンコンクリートの値に比べて僅かに大きいに過ぎないが、繰返し応力度の絶対値で考えると、かなり有利になるものと考えられる。

2. 供試体の破壊状況

繰返し载荷による供試体の破壊は、はり供試体の引張側の縁端部にほぼ直角に発生したひびわれ (肉眼で確認できるもの一本) が、繰返し载荷回数の増加に伴って上方に成長して生じた。ひびわれの発生と破壊に至るまでの過程は、2, 3 の例外を除き、次のように分類される;

- 繰返し荷重が大きく、最初の载荷によって中立軸付近までひびわれが発生した供試体は、数百回程度の繰返し载荷により破壊する。
- 1~5 万回の繰返し载荷によりひびわれが発生した供試体は、10~100 万回の繰返し载荷で破壊する。
- 100 万回程度までの繰返し载荷によってもひびわれの発生が見られない供試体は、200 万回の繰返し载荷においても破壊しない。

このように、肉眼で確認できる程度のひびわれが発生してから破壊に至るまでに相当数の繰返し载荷を必要とするところは、プレーンコンクリートと著しく異なるところである。また、供試体の破壊面には、引抜けた鋼繊維が多数突出していたが、破断している鋼繊維も見受けられた。しかし、その数は僅かであり、供試体の破壊は、鋼繊維の引抜けが主な原因となって生ずるものと考えられる。

3. たわみ量の変化

疲労試験途中の静的载荷によりたわみを測定した結果の一例を図-3 に示す。これによると最大荷重時におけるたわみ量、ヒステリシス曲線で囲まれる面積は、第一回载荷時に大きく、その後一度小さくなるが、载荷回数の増加によってもほとんど変化を示さない状態を続け、破壊近くなると急激に増加する傾向を示している。ひびわれの発生によってもほとんど変化が見られず、 $SFR C$ では発生したひびわれは弾性的な挙動を示し、荷重を除くと閉じてしまうものと考えられる。

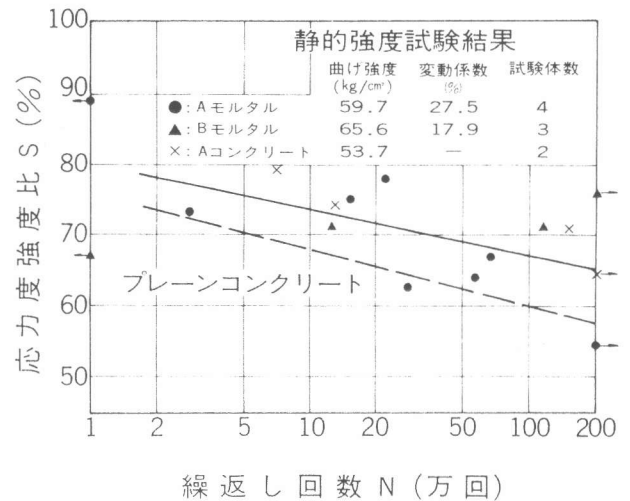


図-2 疲労曲線

4. 鋼繊維の配向および分散

鋼繊維の配向および分散を検討するために疲労試験および静的試験を終了した供試体を表-2に示すように3方向に切断し、予備試験で確認した断面積以下の点状に見える鋼繊維の本数を測定して、これを各断面を横切る方向の鋼繊維数とした。その結果は、鋼繊維の単位面積当りの本数(繊維密度)として表-2に示した。各方向の繊維密度の平均値には差が見られ、長軸方向の値が最も大きく、次いで断面方向、上下方向の順となっている。

長軸方向の繊維密度の平均値は、3次元ランダム配向の理論値より大きく、使用した2種類の鋼繊維いずれの場合も、供試体の長軸方向(型枠に平行な方向)に多く配向する傾向があり、その傾向は、Aファイバーに比べて長さが長く、断面積の大きいBファイバーで幾分顕著のように思われる。一般に、鋼繊維は、断面積が同じならば長さの長いものほど、また長さが等しければ断面積が大きいものほど、長軸方向に配向する傾向があり、また重力の作用する方向に直角となる傾向があると云われており、今回の実験結果もこれらの傾向と一致しているものと思われる。

また、長軸方向の繊維分布について調査した切断面(15×20cm)における繊維密度の変動係数は、表-4に示すようにおよそ14~21%となり、よく管理された実験室で製造された供試体であるにもかかわらず鋼繊維の分布には、かなりのばらつきが見受けられる。

5. 鋼繊維の分布のばらつきについての検討

SFRCの曲げ疲労強度および静的破壊強度の試験結果は、図-1に示すようにかなりばらつき、静的破壊強度の変動係数は、Aファイバーを使用した場合で27.5%、Bファイバーで17.9%とかなり大きい値を示している。このように変動係数が普通コンクリートの曲げ強度の変動係数3~5%に比べて大きくなっている主要原因として、混入される鋼繊維の分布のばらつきが考えられる。このため、供試体の長軸方向に配向している鋼繊維がSFRCの補強効果に有効に作用するものとして、長軸方向に配向している鋼繊維のばらつきを検討することにした。

長軸方向に配向している鋼繊維について、切断面を小面積(3×3cm, 最上部のみ2×3cm)に区分して調査した結果、断面内での変動状況は表-3に示すように標準偏差 $\sigma = 0.89 \sim 1.82 \text{ 本/cm}^2$ (Aファイバー), $0.86 \sim 1.74 \text{ 本/cm}^2$ (Bファイバー)を示しているのに比べて、切断面(15×20cm)間の標準偏差は表-4のようにそれぞれ $\sigma = 0.62 \text{ 本/cm}^2$ および 0.73 本/cm^2 と小さい値を示している。このように繊維密度分布のばらつきは、対象とする断面の大きさにより異なり、断面が大きいほど小さくなる。また、切断面の繊維密度は、変動係数13.7%(Aファイ

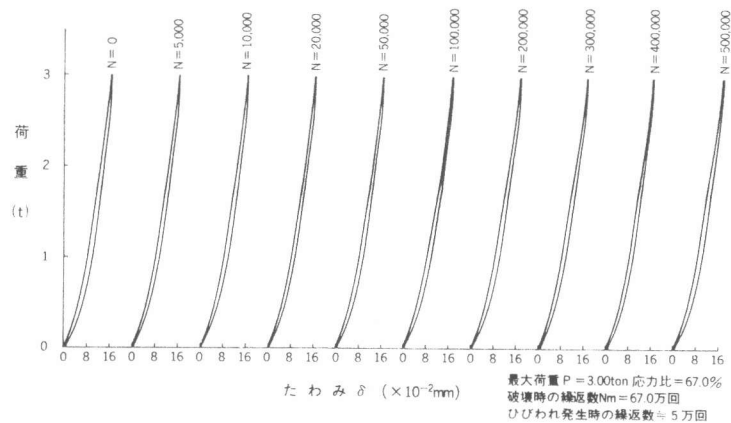


図-3 荷重-たわみ曲線

表-2 各方向における繊維密度の平均値 (本/cm)

鋼繊維の種類	長軸方向	断面方向	上下方向
Aファイバー	4.5	2.8	1.4
Bファイバー	3.5	1.8	1.1

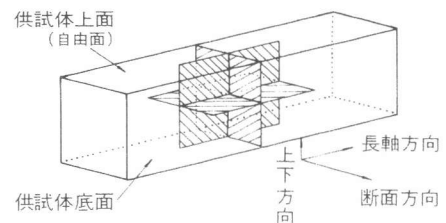


表-3 繊維密度(3×3cmに区分した場合)

鋼繊維の種類	各区分における繊維密度			各断面(15×20cm)の標準偏差		各断面(15×20cm)の実動係数(%)	
	平均値	最大値	最小値	最大	最小	最大	最小
Aファイバー	4.54	9.89	0.44	1.82	0.89	52.4	18.7
Bファイバー	3.53	8.22	0.22	1.74	0.86	68.7	23.2

表-4 繊維密度(断面(15×20cm)の場合)

鋼繊維の種類	実 験 値					理論値(Parim)のモデル			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数(%)	試験個数(個)	3次元的配向	2次元的配向	1次元的配向
Aファイバー	4.5	6.1	2.9	0.623	13.7	69	4.0	5.1	8.0
Bファイバー	3.5	5.1	1.6	0.734	20.7	49	2.0	2.6	4.0

バー), 20.7% (Bファイバー) とかなりばらついており, この繊維密度の変動が静的破壊強度および疲労強度をばらつかせる大きな要因であると見做すことができるものと考えられる。

IV. 鋼繊維の補強効果のばらつきに関する考え方

SFRCを使用した構造部材などの設計を行なうためには, 前述したような鋼繊維による補強効果の変動を明らかにしておく必要がある。このための一つの方法として, ある方向に配向している鋼繊維が補強効果に有効であるとして, 次のように考えた。即ち, 各切断面における鋼繊維の分布状況は, 使用している鋼繊維の長さに対応する部材長における繊維密度の分布を示していると仮定し, その繊維密度が平均値 μ , 標準偏差 σ の正規分布に従うものとする。対象としている部材の長さが鋼繊維長の n 倍であれば, その部材内の繊維密度がある値と下回る確率は, 鋼繊維の長さに対応する部材長での値の n 倍とする考え方である。一す, 断面内での繊維密度分布に対しては, データの数が多くなれば, 統計的に各部分の繊維密度 x_i が平均値 μ , 標準偏差 σ の正規分布をなすとすれば, n 部分 n からなる各断面における繊維密度の平均値 \bar{x} は, 平均値 μ , 標準偏差 σ/\sqrt{n} の正規分布をなすとする考え方を導入できるであろう。

このような考え方の妥当性については, 数多いデータの集積を行ない確認する必要がある。さらに小寸法の供試体について行なった室内実験のデータを実構造物に適用するためには, 実構造物の断面形状, 採用される施工法により影響されるであろう鋼繊維の配向および分散などについて検討する必要があるものと思われる。

V. まとめ

今回実施したSFRCの疲労試験の結果をまとめると次のようである。

- 1) SFRCの疲労強度は, 静的破壊強度の約65%となり, プレーンコンクリートの値に比べて5~10%大きい。しかし, 今回の実験では, SFRCの疲労強度に及ぼす鋼繊維の形状寸法, マトリックスの種類の影響を明らかにするには至らなかった。これらと鋼繊維混入率の影響などは今後に残された問題である。
- 2) SFRCの疲労破壊は, 鋼繊維のひびわれ拘束性によりひびわれの発生から相当数の繰返し载荷を行なった後に生じており, プレーンコンクリートと著しく異なる点である。
- 3) SFRCの疲労破壊に至るまでのはりのたわみ量およびヒステリシス曲線で囲まれる面積は, 破壊近くになって急激に増加する以外は, ひびわれの発生によってもほとんど変化を示さず, ひびわれが鋼繊維の連結作用により弾性的な挙動を示していることが推察される。
- 4) SFRCの静的破壊強度および疲労試験の値は, かなりばらついているが, その大きな要因として混入した鋼繊維の中でSFRCの補強効果に有効に作用する方向に配向している鋼繊維密度の変動が考えられる。

以上のように今回実施した実験の結果, SFRCの疲労強度はプレーンコンクリートに比べて大きくなること一応確認された。しかし, 今回の実験は, あくまでも断面15×20cmの小型のはり供試体について, スパン80cm純曲げスパン25cmとした結果である。今後実構造物の設計に適用するためには, 実構造物の断面形状での鋼繊維の配向および分散, 鋼繊維の配向および分散に及ぼす施工法の影響について検討するとともに, 前述した鋼繊維の補強効果のばらつきに関する考え方についても検討を続ける予定である。

(参考文献)

- 1) C.E.Kesler; Fatigue and Fracture of Concrete, (訳) 成岡昌夫, 都築和夫, コンクリートジャーナル, Vol. 9 No.12 Dec.1971
- 2) G.Batson, C.Ball, L.Bailey, E.Landers, J.Hooks; Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, Journal of ACI, Nov.1972
- 3) 藤田嘉夫, 海保康男; コンクリートの引張り, 圧縮および曲げに関する疲労性状, セメント技術年報XXI, 42
- 4) 和泉意登志; 鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向と分散について, 鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム(日本コンクリート工学協会)1977
- 5) 小林一輔, 山本博之, 睦好宏史; 鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向および分散に関する研究, 同上
- 6) コンクリート便覧, 日本コンクリート工学協会編一技報堂